



**PROYECTO FIN DE CARRERA
INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**“INSPECCIÓN DE PIEZAS INDUSTRIALES MULTI-MATERIALES
CON TOMOGRAFÍA COMPUTERIZADA INDUSTRIAL”**

Autor: **Cristian Piedrafita Muñoz**

Director: Sebastian Pollmanns

Ponente: Ana Cristina Murillo Arnal

Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas

Centro Politécnico Superior

Universidad de Zaragoza

Curso 2009-2010

Julio 2010

INSPECCIÓN DE PIEZAS INDUSTRIALES MULTI-MATERIALES CON TOMOGRAFÍA COMPUTERIZADA INDUSTRIAL

RESUMEN

La aplicación industrial de la Tomografía Computerizada (TC) para la inspección y la caracterización geométrica de las piezas industriales dentro del campo de la calidad está creciendo rápidamente. El principal potencial de esta tecnología está relacionado con la capacidad de adquirir datos volumétricos de alta resolución tanto en la parte externa como interna de la pieza, permitiendo así analizar más a fondo la pieza para la posible detección de defectos (imperfecciones, soplos, burbujas,...) sin necesidad de ensayos destructivos.

El proyecto presentado en esta memoria muestra un nuevo método diseñado, implementado y evaluado durante la realización del mismo, para mejorar la inspección de piezas industriales en TC, ya que hasta ahora el uso de TC se limita el trabajo de piezas hechas de una material o combinaciones de materiales con densidades casi iguales. La inspección de piezas formadas por múltiples materiales, como son por ejemplo el plástico y el metal, sufre de artefactos en las proyecciones obtenidas mediante la TC, los cuales se producen en el proceso de reconstrucción y reducen la calidad del modelo volumétrico de manera significativa.

El objetivo de este proyecto es el desarrollo de un algoritmo, para fusionar las diferentes proyecciones procedentes de las mediciones que se generan directamente del TC a diferente nivel de tensión, para así permitir obtener más información acerca de las características de atenuación de la pieza inspeccionada.

Al calcular las diferentes proyecciones a diferentes tensiones, los correspondientes niveles de gris no coinciden y se precisa de un escalado para ajustar las pilas de proyecciones. Para la fusión de dichas proyecciones se han utilizado dos métodos, el escalado hacia arriba o "upscaling" dónde los valores pertenecientes a la imagen de bajo nivel se multiplican por un factor para ajustarse a los píxeles de alto nivel, aumentando así su nivel de gris y el escalado hacia abajo o "downscaling" dónde ocurre lo contrario, son ahora los píxeles de alto nivel los que se ajustan a los de bajo nivel reduciendo así su valor. Además se ha realizado un experimento obviando el uso del escalado para demostrar la verdadera necesidad de fusionar las distintas proyecciones y hacer coincidir los niveles de gris para trabajar sin saltos en los mismos.

Todos los experimentos se han realizado con una de las tecnologías para TC más punteras, como es la Metrotom 1500. Tras una detallada planificación evaluando las posibles variaciones en los parámetros del proceso, se llevaron a cabo los distintos experimentos de manera rigurosa y evaluando sus errores respecto a los datos de referencia, como son la reconstrucción del modelo sin metal en su interior y la reconstrucción obtenida a un alto nivel de tensión.

Después de evaluar los resultados, se puede confirmar que el método desarrollado cumple con los objetivos y disminuye el nivel de artefactos presentes en el modelo. Todavía quedan una serie de problemas sobre los que habría que seguir investigando, para diferenciar con mayor exactitud los niveles medios en los diferentes materiales.

Resumen	i
----------------------	----------

Contenidos

1 Introducción.....	5
1.1 Situación inicial y actuales limitaciones en la aplicación de la Tomografía Computarizada	6
1.2 Objetivos.....	7
1.3 Estructura del trabajo	7
2 Trabajo relacionado.....	9
2.1 Principio de funcionamiento de la TC.....	10
2.2 Artefactos en imágenes en las medidas en TC	12
2.2.1 “Cupping”	13
2.2.2 Rayas o bandas oscuras.....	13
2.3 Fusión de imágenes.....	14
3 Desarrollo de un algoritmo de fusión para las proyecciones.....	15
3.1 Bases Teóricas	15
3.1.1 “Upscaling”	16
3.1.2 “Downscaling”	17
4 Realización del estudio experimental	19
4.1 Plan experimental	21
4.1.1 Experimentos con las proyecciones de bajo y alto nivel de energía	22
4.1.2 Experimentos con las proyecciones de medio y alto nivel de energía	23
4.2 Criterios de evaluación.....	24
4.3 Presentación de los resultados con fusión	26
4.3.1 Fusión de las pilas de proyecciones obtenidas con baja y alta energía.....	26
4.3.2 Fusión de las pilas de proyecciones obtenidas con media y alta energía.....	28
4.3.3 Fusión sin escalado	32
5 Evaluación y análisis de los resultados.....	34
6 Conclusiones y Perspectivas	37

ANEXOS

I	Implementación de un algoritmo utilizando Matlab	39
II	Memoria en inglés	46
III	Tabla de símbolos y abreviaciones.....	84
IV	Índice de figuras y tablas	85
V	Bibliografía.....	88

1 Introducción

El desarrollo de este Proyecto Fin de Carrera ha tenido lugar en el “Laboratory for Machine Tools and Production Engineering, WZL” en la Universidad RWTH de Aachen, Alemania, en el departamento de “Production Metrology Quality Management”. La supervisión del mismo ha sido llevada a cabo por el jefe de equipo Dipl.-Ing. Sebastian Pollmanns en la Universidad de Aachen y por Ana Cristina Murillo por el Centro Politécnico Superior de Zaragoza.

La RWTH de Aachen es la mayor universidad técnica en Alemania y una de las más reconocidas de toda Europa. El laboratorio de máquinas y herramientas (WZL) en la RWTH de Aachen es sinónimo de innovación en tecnología de producción. En este contexto, los expertos de la cátedra de Producción Tecnológica de Medición y Gestión de la Calidad del Prof. Dr. Robert Schmitt están trabajando en soluciones prácticas para diversas industrias. Para ello, se están desarrollando y personalizando conceptos de integración para su aplicación en las empresas.

El área de investigación de Producción Tecnológica de Medición y Gestión de la Calidad opera dentro de los ámbitos del desarrollo y optimización de tecnologías de medición, y en la producción integrada de Metrología. Ha sido en esta área de investigación donde se ha desarrollado el proyecto para tratar de obtener una mejor resolución en las reconstrucciones de piezas industriales formadas a partir de materiales con distintas densidades como son el plástico y el metal.



Figura 1.1: Metrotom 1500 [ZEIM10]

La principal tecnología que utilizan y que se usará en este proyecto es una Metrotom 1500, de Carl Zeiss [ZEIM10], que se utiliza para las mediciones de la Tomografía Computerizada (TC). Las pruebas de rayos X en piezas fundidas permite detectar inclusiones tales como gas, aire o cuerpos extraños gracias a la diferencia de atenuación que existe entre dicho material y las inclusiones. La generación de una imagen TC tridimensional comienza con la adquisición de una serie de imágenes (proyecciones) bidimensionales mientras la muestra gira 360° de forma gradual ($<1^\circ$). Estas proyecciones contienen información sobre la posición y la densidad de las características de absorción del objeto que se está estudiando. Junto con la geometría de la estructura, este conjunto de datos se utiliza para la reconstrucción numérica del volumen. El conjunto de datos obtenidos sobre el volumen

resultante se muestra en secciones transversales o en una imagen en 3D. En la Fig.1.2 se muestra un esquema de cómo se obtienen las proyecciones. En el capítulo 2, Trabajo relacionado, se explica en más detalle el funcionamiento del TC.

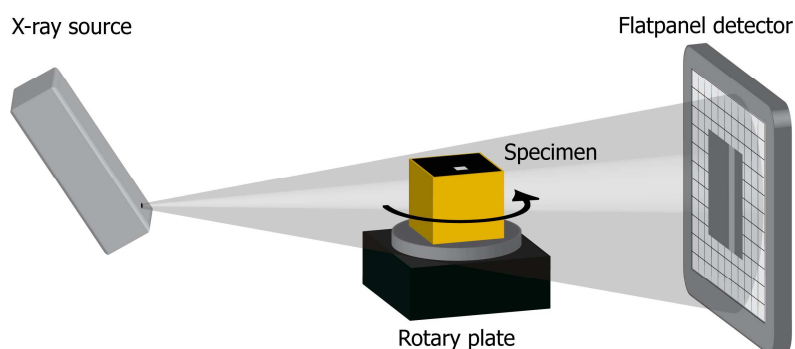


Figura 1.2: Esquema de obtención de las proyecciones [HEIN08]

1.1 Situación inicial y actuales limitaciones en la aplicación de la Tomografía Computarizada

La Tomografía Computarizada (TC) ha experimentado un enorme crecimiento en los últimos años, en términos industriales y en aplicaciones médicas. Se han logrado muchas mejoras en importantes componentes de los TC, tales como son los tubos, detectores, anillos colectores, sistemas de adquisición de datos y algoritmos [HSIE03, P. 1-2].

La aplicación de la tomografía industrial computerizada para la inspección y la caracterización geométrica de las piezas de trabajo en el ámbito del aseguramiento de la calidad está creciendo rápidamente. El principal potencial de esta tecnología se relaciona con la capacidad de adquirir datos volumétricos con alta resolución tanto en el exterior como en las regiones interiores de las piezas, además estas regiones internas pueden ser analizadas, por ejemplo, en el campo de ensayos no destructivos de materiales.

Sin embargo todavía existen algunas limitaciones en las aplicaciones de la TC. Hasta ahora el uso de las TC industriales se limita al trabajo de piezas hechas de un material o combinaciones de materiales con densidades parecidas. En un principio no es posible la medida de objetos con alta relación de anchura ($\text{ratio anchura/grosor}$) ya que el cambio de grosor del material influye en la intensidad que queda una vez que la radiación ha pasado por la pieza analizada. En segundo lugar, en las piezas constituidas por diferentes materiales absorbentes sólo se pueden medir los componentes de alta absorción adquiridos con una buena relación señal-ruido, es decir, con una alta exactitud y una incertidumbre de medición baja.

Se debe asegurar una intensidad remanente después de que la radiación pase la parte más densa de la muestra, esto se consigue variando la radiación y los parámetros de adquisición (por ejemplo, tensión, corriente, tiempo de integración). Sin una intensidad remanente adecuada la reconstrucción no conducirá a resultados adecuados y aprovechables. Como una alta energía de radiación es necesaria para asegurar intensidades remanentes mayores que cero, los componentes de baja absorción a veces son eclipsados y por lo tanto no

visibles después de la reconstrucción [KRÄM10]. También la inspección de piezas de trabajo multi-materiales, por ejemplo hechas de plástico y metal, actualmente sufren de artefactos en imágenes que ocurren durante el proceso de reconstrucción y reducen la calidad del modelo volumétrico significativamente.

1.2 Objetivos

El objetivo general a desarrollar este Proyecto Fin de Carrera, consiste en conseguir la fusión de dos pilas de proyecciones tomadas con diferentes energías para obtener una mejor resolución en todos los diferentes tipos de materiales. Con este proceso, el objetivo es lograr una correspondencia entre cada pixel tomado con bajo y alto nivel de intensidad, para así obtener una imagen en la cual los diferentes materiales sean claramente visualizados.

Este método requiere la sujeción de la pieza de trabajo mientras las dos pilas de proyecciones están siendo tomadas. Para facilitar la fusión, ambas pilas tienen que consistir en la misma cantidad de proyecciones tomadas con la misma variación angular.

El problema es la adquisición volumétrica de la pieza de trabajo consistente en varios materiales, porque con los diferentes materiales hay diferentes capacidades de absorción, y por ello los parámetros de adquisición pueden ser optimizados para un material u otro. Por ejemplo, el metal tiene una capacidad de absorción mayor que el plástico, si los parámetros son optimizados para el metal, los componentes de plástico sufrirán sobreexposición y eclipsamiento en la proyección. La situación puede ser incluso peor si el proceso de adquisición es optimizado para el plástico, porque la baja energía de radiación puede no ser suficiente para pasar a través de las partes de metal. Por ello la intensidad remanente detrás de las partes de metal es igual a cero, lo que hace el proceso de retroceso filtrado imposible (del inglés, filtered back projection FBP) (ver sección 2.1). En estos casos es necesario tener un especial cuidado con los artefactos, los cuales aparecen con baja intensidad, la razón de estos errores o artefactos será explicado con posterioridad.

Por todas estas razones, el principal objetivo de este Proyecto Fin de Carrera es el desarrollo de un algoritmo que permita una apropiada fusión de las diferentes pilas de proyecciones.

1.3 Estructura del trabajo

Después de este primer capítulo dónde se han introducido las actuales limitaciones en el campo de la TC y los objetivos del proyecto, los siguientes capítulos se repartirán de la siguiente manera:

En el Capítulo 2, Trabajo Relacionado, se explican los principios básicos de la TC y como opera. Otra importante sección dentro de este capítulo es en la que se refiere a los artefactos en las imágenes, dónde se explican los diferentes artefactos y su procedencia. Es importante saber sobre ellos, puesto que el objetivo es reducirlos. Al final del capítulo hay una breve descripción sobre los estudios previos que también han usado la fusión de imágenes y su relación con este trabajo.

En el Capítulo 3, Desarrollo de un algoritmo de fusión para las proyecciones, se explica la idea utilizada para la fusión de las proyecciones y se explican tanto el concepto de “upscaling” como “downscaling” utilizado.

En el Capítulo 4, Realización del estudio experimental, se presenta el plan seguido para desarrollar los experimentos, se comentan los criterios de evaluación y los datos de referencia y se muestran los resultados obtenidos.

Para finalizar en el Capítulo 5, Evaluación y análisis de los resultados, como su propio nombre indica se analizan los resultados obtenidos y en el Capítulo 6, Conclusiones y Perspectivas, se comentan las conclusiones y las posibles mejoras a desarrollar para futuras investigaciones.

2 Trabajo relacionado

La radiación de rayos X es una forma de onda electromagnética, como las ondas microondas, infrarrojas, la luz visible, ultravioleta y las ondas de radio. El rango de longitud de onda de los rayos X va desde unos pocos picómetros a unos pocos nanómetros. La energía de cada fotón de rayos X, E , es proporcional a su frecuencia, ν , y es descrito por la siguiente expresión:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{Eq2.1}$$

donde h es la constante de Planck y es igual a ($6,63 \times 10^{-34}$ Js), c es la velocidad de la luz ($3 \cdot 10^8$ m/s), y λ es la longitud de onda de los rayos X. Por lo tanto, los fotones de rayos X con longitudes de onda mayores tienen menor energía que los fotones de longitudes de onda cortas. Para mayor comodidad, la energía de rayos X se expresa generalmente en unidades de eV ($1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$). Esta es la cantidad de energía cinética con la que un electrón se acelera a través de un potencial eléctrico de 1 V. Dado que los fotones de los rayos X se producen al golpear el material con electrones de alta velocidad (la energía cinética es transformada en radiación electromagnética), el máximo posible de energía de fotones de rayos X es igual a toda la energía cinética del electrón. La siguiente ecuación se puede convertir en unidades de eV:

$$E = \frac{1.24 \times 10^3 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{\lambda} \quad \text{Eq2.2}$$

Los rayos X con longitudes de onda en el rango de 10 nm (124 eV) a 0,1 nm (12.4k eV) a menudo son llamados rayos X blandos, debido a su falta de capacidad de penetrar en capas gruesas de materiales. Estos rayos X tienen menor valor en radiología. La longitud de onda de rayos X en diagnóstico varía aproximadamente de 0,1 nm a 0,01 nm, que corresponde a un rango de energía de 12,4 keV a 124 keV. Aunque los rayos X con longitud de onda más corta son altamente penetrantes, no aportan mucha información de bajo contraste y, por tanto, son de poco interés en diagnósticos [HSIE03, P. 28].

Para ilustrar, la Fig.2.1 muestra el espectro electromagnético, con diferentes tipos de ondas electromagnéticas.

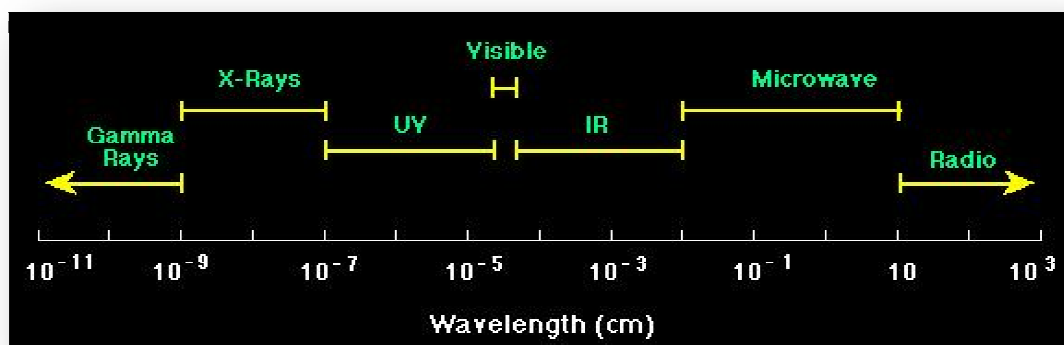


Figura 2.1: Ilustración del espectro electromagnético [CSEP10]

El rango típico de energía de los fotones de rayos X generados por TC de uso médico es aproximadamente entre 20 keV y 140 keV. Sin embargo, los μ TC industriales, entre los cuales se encuentra el Metrotom 1500, tienen un rango de energía entre 80keV y 225keV [HEIN08].

En este rango de energía hay tres formas fundamentales en las que los rayos X interactúan con la materia: el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la dispersión coherente [HSIE03, P. 31-34], el efecto neto de estas interacciones es que algunos de los fotones son absorbidos o dispersados. En otras palabras, los fotones de rayos X se atenúan cuando pasan a través de un material. La atenuación puede ser expresada por una relación exponencial para un haz incidente de rayos X monocromático (monoenergético) y un material de densidad uniforme.

$$I = I_0 e^{-(\tau + \sigma + \sigma_r)L} \quad \text{Eq.2.3}$$

donde I e I_0 son las intensidades de rayos X incidente y transmitida, L es el espesor del material (cm), τ , σ y σ_r son los coeficientes de atenuación del fotoeléctrico, Compton y efecto de la dispersión coherente en las interacciones con el material respectivamente. La ecuación anterior es a menudo expresada como:

$$I = I_0 e^{-\mu L} \quad \text{Eq.2.4}$$

donde μ es el coeficiente de atenuación lineal del material. A esta ecuación se le conoce como la Ley de Lambert-Beers.

2.1 Principio de funcionamiento de la TC

Desde el desarrollo de los rayos X en TC y su rápida aceptación en el diagnóstico médico, la TC se ha convertido en una herramienta poderosa para ensayos no destructivos, y además en la última década se ha adoptado a la metrología. La TC ofrece nuevas posibilidades para coordinar las medidas, ya que es posible adquirir un modelo volumétrico de la pieza entera con una sola medición, de esta forma, es posible la detección y el análisis de las características interiores que no accesibles de otra manera, como es la detección de defectos (imperfecciones, soplos, burbujas) y también es muy útil para el análisis de espesores, todo ello dentro del rango de incertidumbre de los micrómetros.

El principio de medición de la TC, tal y como se muestra en la Fig.2.2, se basa en la atenuación de la radiación por el objeto de medición, el cual es dependiente del material (número atómico, densidad) y la longitud del camino de propagación de los rayos X.

En comparación con la TC médica, la TC industrial utiliza un principio diferente, el principio de la TC industrial común, también conocida como TC de haz cónico. El tubo emite energía de alta radiación de rayos X ($E \sim 80\text{-}225$ keV), que es en parte absorbida por el objeto de medición y la intensidad restante es detectada por los detectores de panel plano de silicio [WECH09].

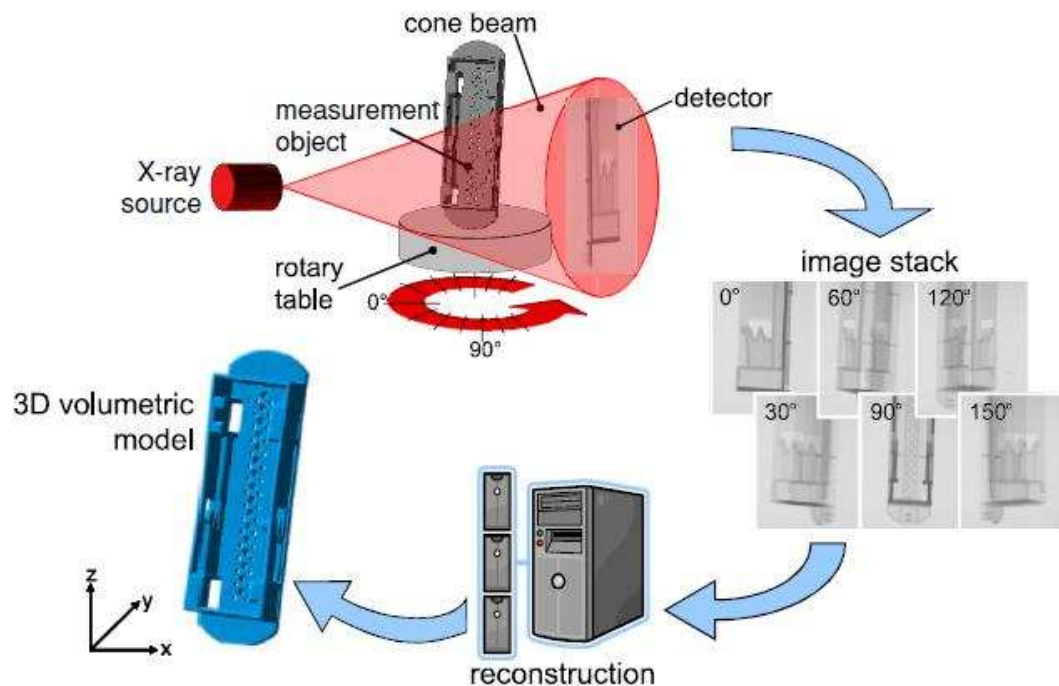


Figura 2.2: Principio básico del funcionamiento de la tomografía computarizada industrial [WECH09]

A diferencia de la radiografía donde sólo se evalúa una única imagen, en la TC la pieza rota 360° en una cantidad definida de ángulos donde las proyecciones son adquiridas. Esto es importante para la calidad de los resultados de las mediciones, pero también una mayor graduación influye en el aumento del tiempo [KAST04].

Una de las principales características de los rayos X es su espectro policromático. La fuente emite radiación de longitudes de onda y energías diferentes, lo cual lleva a una de las principales características en la TC, denominado endurecimiento del haz (beam hardening) [WECH09].

En conjunto, estas proyecciones forman una pila de imágenes que pueden ser reconstruidas mediante algoritmos matemáticos basados en el trabajo de Radon ya publicado en 1917 y ejecutado por Feldkamp en 1984 [FELD84]. Para aumentar la calidad de la imagen y por lo tanto, la calidad del modelo volumétrico resultante, las proyecciones se filtran antes de la reproyección, por eso este método de reconstrucción que se llama "retroproyección filtrada" (del inglés, filtered backprojection) (FBP), este método es el más común y el más utilizado en la reconstrucción de la imagen en la TC. FBP supone que cada haz de rayos X utilizados para la reconstrucción de la imagen es monoenergético. Bajo este supuesto, existe una relación lineal entre los datos de atenuación de medida y el grosor de un determinado material. Aunque en realidad los haces de rayos X son polienergéticos. Por lo tanto, la atenuación total ya no es una función lineal del espesor de los objetos. Para reducir este problema los escáneres TC suelen estar equipados con el software de corrección que se ha optimizado para los tejidos del cuerpo incluyendo el hueso (TC médica), pero no para los objetos de alta atenuación como el metal [MAHN03].

El conjunto de datos resultante de la reconstrucción se compone de elementos volumétricos (voxels) donde cada uno de ellos representa un valor específico de gris que es proporcional a la intensidad de la radiación adquirida. Así que los voxels son el equivalente en 3D de los conocidos píxeles de imágenes 2D [WECH09].

2.2 Artefactos en imágenes en las medidas en TC

La definición de un artefacto en imágenes no está tan especificada como cabría esperar. En teoría, un artefacto de imagen se puede definir como una discrepancia entre los valores reconstruidos en la imagen y los reales coeficientes de atenuación del objeto. En comparación con la radiografía convencional, los sistemas de TC son más propensos a los artefactos, debido a que una imagen de TC se genera con un mayor número de proyecciones, (en nuestro caso sobre 700). En un sistema típico de TC, cada proyección contiene aproximadamente 1000 mediciones por separado. Como resultado casi 10^6 lecturas independientes se utilizan para crear una imagen. [HSIE03; P.167].

En general, los artefactos en imágenes de TC se pueden clasificar en cuatro categorías principales: rayas, sombreado, anillos y bandas, y varios [HSIE03; P.167-168]. Es posible agrupar los orígenes de estos artefactos en cuatro categorías: (a) artefactos basados en la física, que resultan de los procesos físicos involucrados en la adquisición de datos de TC, (b) los artefactos causados por la pieza de trabajo, que son causadas por tales factores como el movimiento de la pieza o la presencia de materiales metálicos en la pieza de trabajo, (c) los artefactos basados en el escáner, que se derivan de las imperfecciones en el funcionamiento del escáner, y (d) artefactos producidos por el proceso de reconstrucción de la imagen [BARR04].

Aquí nos centramos en dos clases de artefactos, el “cupping” y las “streaks or dark bands” o rayas o bandas negras, ya que son los más importantes en nuestro trabajo. Para más detalles y el resto de artefactos ver Anexo II Memoria en inglés.

El algoritmo de reconstrucción en TC se basa en la suposición de que un volumen determinado atenúa los rayos X de la misma manera independientemente del ángulo de proyección o de la longitud del camino de propagación. Pero no es así, por el ello, el coeficiente de atenuación lineal μ , no cambia linealmente a lo largo del camino de propagación. De ahí que la muestra de la imagen reconstruida parezca tener cambios de densidad en función de su lugar en el volumen. La mayoría de los materiales absorben los rayos X de baja energía mejor que los rayos X de alta energía, principalmente debido a la absorción fotoeléctrica. Un material típico tiene un alto coeficiente de atenuación para fotones de baja energía y un bajo coeficiente de atenuación para fotones de alta energía. Por ejemplo, cuando los fotones de rayos X con energías diferentes se dirigen a una capa de tejido blando, los fotones con energías más bajas se absorberán más que los fotones de alta energía. Los fotones con energías por debajo de 10keV son casi totalmente absorbidos, y en consecuencia, un haz de rayos X heterogéneo se convierte proporcionalmente más rico en fotones de alta energía (más penetrante o más duro, del inglés “harder”) [KRUM08] [HSIE03; P.221-223] [BARR04].

Por esta razón este efecto se llama endurecimiento del haz (del inglés “beam-hardening”) y dos tipos de artefactos pueden ser resultado de este efecto entre objetos densos en la imagen: “cupping” y la aparición de bandas oscuras o rayas (del inglés “dark band or streaks”).

2.2.1 “Cupping”

Los rayos X que pasan a través de la porción central de un cilindro uniforme se endurecen más que los que pasan por el borde, ya que pasan por más material. Cuando el haz se vuelve más duro, la velocidad a la que se atenúa disminuye, por lo que el haz es más intenso cuando alcanza los detectores de lo que cabría esperar sino se hubiese endurecido. Por lo tanto el perfil de atenuación resultante difiere del perfil ideal que se obtendría sin endurecimiento del haz [BARR04].

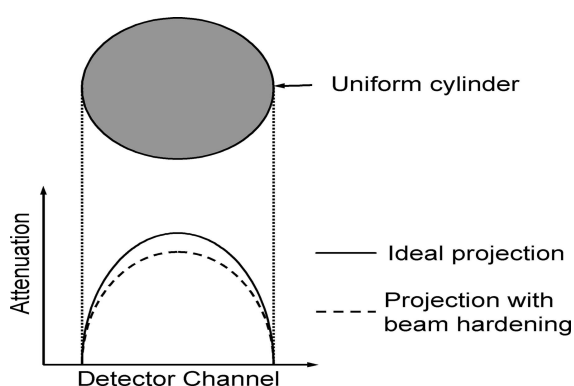


Figura 2.3 Perfiles de atenuación obtenidos con y sin endurecimiento del haz por un haz de rayos X pasando a través de un cilindro uniforme [BARR04]

2.2.2 Rayas o bandas oscuras

En secciones transversales muy heterogéneas, pueden aparecer rayas o bandas oscuras entre dos objetos densos de una imagen. Se produce cuando la porción del haz que pasa a través de uno de los objetos en ciertas posiciones está menos endurecido que cuando pasa a través de ambos objetos en otra posición [KRUM08] [HSIE98].

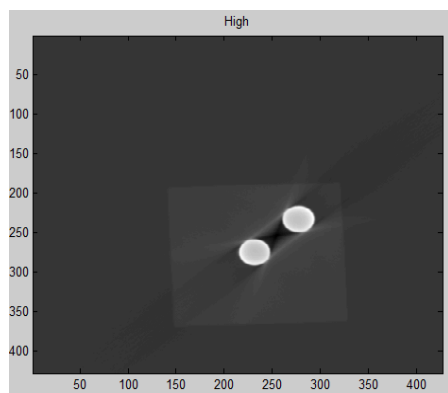


Figura 2.4: Ejemplo de rayas y bandas negras en el modelo utilizado

2.3 Fusión de imágenes

La fusión de imágenes se define como el proceso de combinar información de dos o más imágenes de una escena para aumentar la visualización o compresión de la misma [GOSH05].

La fusión de imágenes es un tema con cada más aplicaciones médicas, militares e industriales. Existen numerosos ejemplos clínicos de interés en fusión de imágenes, cómo la resonancia magnética (RM), la tomografía por emisión de positrones (PET) y la tomografía computerizada para ayudar en la cirugía [DERE94].

En el campo de las aplicaciones industriales hay diferentes usos de la fusión de imágenes, los cuales incluyen técnicas de evaluación no destructivas [BLUM05].

Una de las ideas principales para el desarrollo del presente proyecto está basada en la técnica conocida como Imágenes de Alto Rango Dinámico (del inglés High Dynamic Range Imaging, HDRi). En el procesamiento de imágenes, gráficos de ordenador y fotografía, HDRi es un conjunto de técnicas que permiten un mayor rango dinámico de luminosidad entres las zonas más claras y más oscuras de una imagen, con respecto a las técnicas estándar de imagen digital. Este rango dinámico más amplio permite que las imágenes HDR representen con mayor precisión la amplia gama de niveles de intensidad que se encuentran en escenas reales, las cuales van desde la luz directa del sol a la tenue luz de las estrellas, ya que trabaja con varias fotos obtenidas con distinto nivel de luminosidad [MYSZ05].

La forma de proceder para fusionar las proyecciones se puede asimilar a la anteriormente descrita, pues igualmente se va a trabajar con imágenes obtenidas a distinto nivel de intensidad.

3 Desarrollo de un algoritmo de fusión para las proyecciones

Como ha sido mencionado anteriormente, trabajando a alta intensidad se puede reducir el número de artefactos presentes en las partes metálicas. Por esta razón, los píxeles correspondientes con el metal en la imagen fusionada serán los mismos que los pertenecientes a las proyecciones calculadas con alto nivel de intensidad.

Del mismo modo, debido a la baja densidad del aire, estos píxeles están mejor definidos a baja intensidad. Por ello en las imágenes fusionadas habrá los mismos píxeles en el aire que en las imágenes tomadas con baja intensidad.

3.1 Bases Teóricas

Todo el proceso empleado para la fusión de las proyecciones proviene de la ley de Lambert-Beers, Eq.2.1, función que como se puede observar tiene una forma logarítmica. En la siguiente figura se puede observar cómo ha sido el modelo teórico seguido para la implementación del algoritmo. La Fig.3.1 muestra la penetración de los rayos X en un material homogéneo a distintas intensidades, baja, media y alta.

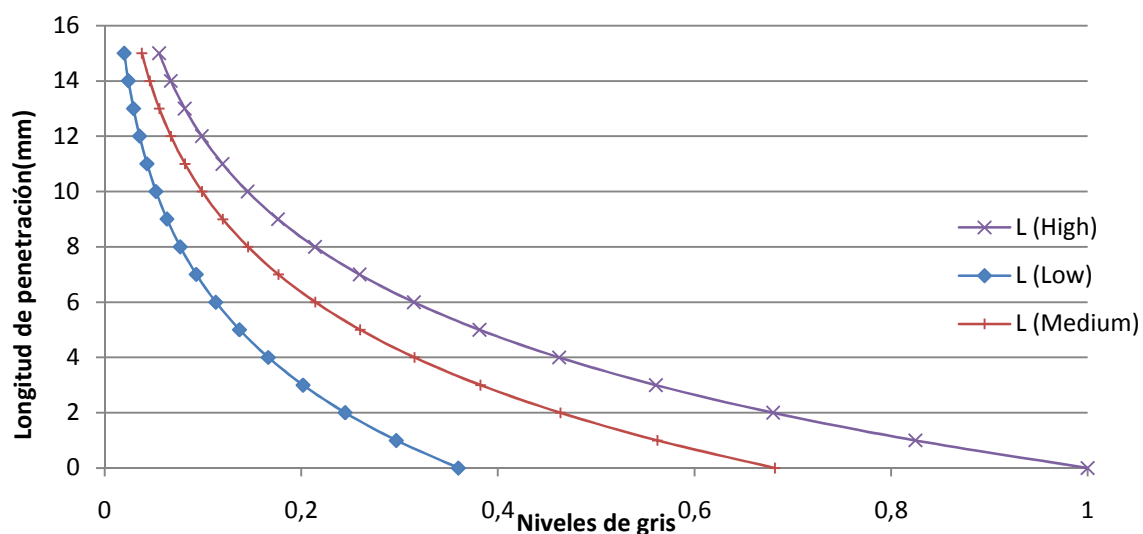


Figura 3.1: Función logarítmica que muestra la penetración de los rayos X en un material homogéneo

En el eje de las X están representados los niveles de gris, y en el de las Y la longitud de penetración.

El eje de las X está entre 0 y 1 porque las proyecciones calculadas con el Metrotom dan los valores de nivel de gris de los píxeles en punto flotante, dónde 0 es negro y 1 es blanco. El eje de las Y muestra la longitud de penetración, que es entre 0 y 15.5 ($22 \cdot \sqrt{2}$), porque 15.5 es la mitad de la diagonal del cubo, y es ahí donde está la máxima longitud de penetración.

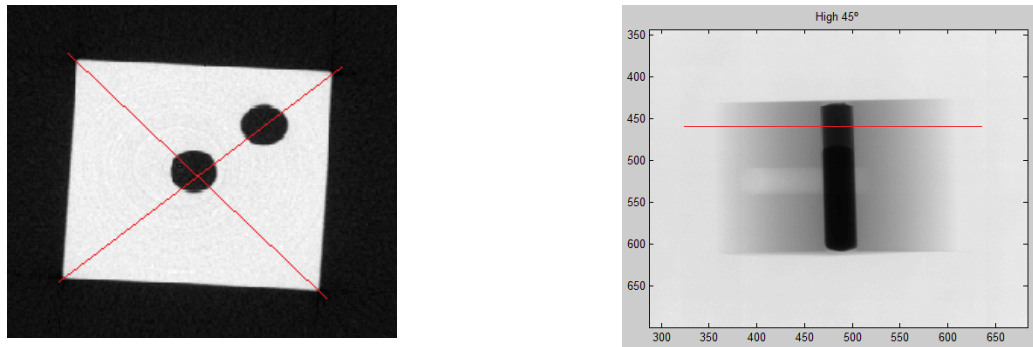


Figura 3.2: Diagonal del cubo

Uno de los objetivos más importantes de este proyecto es encontrar un buen método para fusionar las diferentes pilas de proyecciones, y la idea original se ha obtenido de la anterior gráfica.

Considerando que las diferentes pilas de proyecciones han sido adquiridas usando diferentes energías, los correspondientes píxeles de las dos proyecciones a fusionar no tienen correspondencia en los niveles de gris. Así que es necesario un escalado para ajustar una pila a la otra. Para ello es necesario el cálculo de un factor de escala S , y son dos las maneras de calcularlo:

- Escalado superior (Upscaling)
- Escalado inferior (Downscaling)

Tanto “upscaling” como “downscaling” necesitan valores para los distintos umbrales X_b , X_1 , X_2 y X_a . Las Fig.3.3 y Fig.3.4 muestran los cuatro umbrales necesarios previos al cálculo del respectivo factor de escala, como breve descripción se puede decir que X_b es el límite del metal con el plástico; X_a es usado para separar los píxeles que pertenecen al aire con el resto de píxeles que no pertenecen al aire; X_1 tiene una correspondencia con X_b y X_2 con X_b . El cálculo de estos umbrales está explicado con más detalle en el Anexo I Implementación de un algoritmo usando Matlab.

El método del “upscaling” ha sido aplicado para los píxeles con valores entre X_b y X_2 en la imagen tomada con bajo nivel de intensidad (ver Fig.3.3 para aclaración), y como su nombre indica, estos valores han sido multiplicados por un factor S_u para incrementar su valor de nivel de gris.

Por otro lado, el método de “downscaling” ha sido aplicado para los píxeles con valores entre X_1 y X_a (ver Fig.3.4), en este caso los píxeles han visto su valor decrementado.

3.1.1 “Upscaling”

Cuando el método de “upscaling” es aplicado, los píxeles entre X_b y X_2 en la curva de bajo nivel de intensidad tienen que ser multiplicados por un factor que haga aumentar su valor hasta la curva de alto nivel de energía para evitar la pérdida de niveles de gris.

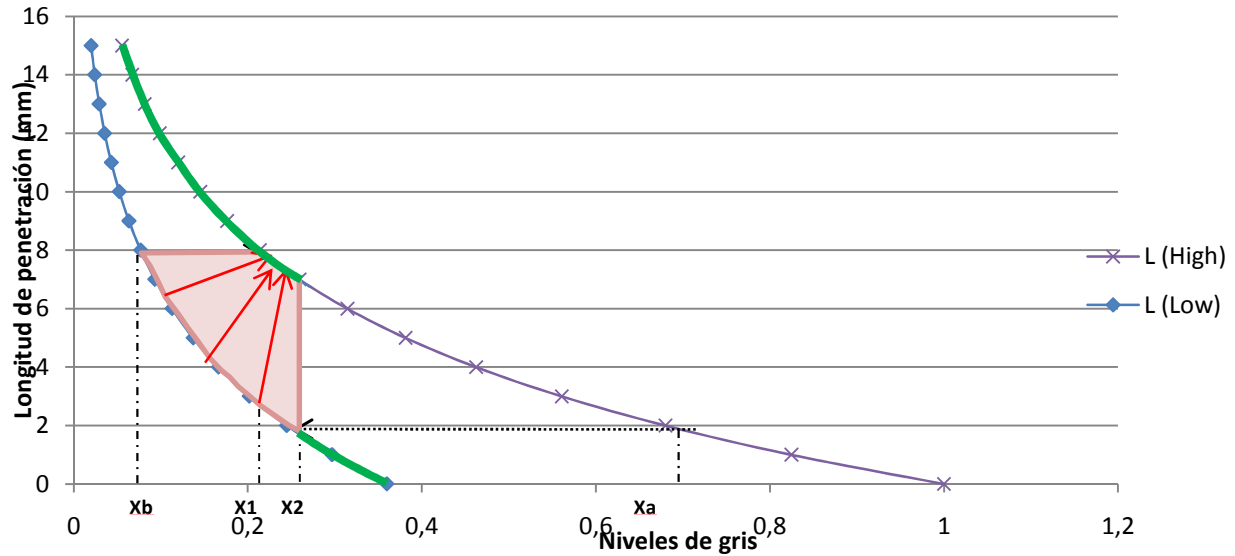


Figura 3.3: “Upscaling”

Para realizar el escalado mostrado en la figura anterior numéricamente se necesita un factor de escala. Como se observa en la gráfica, todos los píxeles entre Xb y $X2$ se tienen que escalar a la sección comprendida entre $X1$ y $X2$, por ello el factor de escala será de la siguiente forma:

$$Su = \frac{(X2 - X1)}{(X2 - Xb)} \quad \text{Eq.3.1}$$

Una vez este valor Su ha sido calculado, trabajando con la misma función obtenemos los nuevos valores de los píxeles tras despejar la variable $matrix_{F(i,j)}$:

$$Su = \frac{(X2 - matrix_{F(i,j)})}{(X2 - matrix_{L(i,j)})} \quad \text{Eq.3.2}$$

$$matrix_{F(i,j)} = Su * (matrix_{L(i,j)} - X2) + X2 \quad \text{Eq.3.3}$$

El resto de los valores entre $X1$ y $X2$ en la curva de alta intensidad han sido obtenidos con esta ecuación.

La variable $matrix_{F(i,j)}$ corresponde con el nuevo valor pixel (i,j) en la nueva imagen, al igual que la variable $matrix_{L(i,j)}$ que es el valor del pixel en la imagen tomada a baja intensidad en la posición (i,j) .

Después de usar el “upscaling”, la nueva imagen fusionada (o pila de imágenes fusionadas) consiste en los píxeles correspondientes con la línea verde que se observa en la Fig.3.3, dónde se puede observar la continuidad de los niveles de gris, sin saltos entre un material y otro.

3.1.2 “Downscaling”

Otra opción que se ha considerado para la fusión de las imágenes ha sido el “downscaling”. Es bastante similar al caso anterior pero con una leve diferencia:

Ahora los píxeles que tiene que ser recalculados son aquellos que se encuentran entre $X1$ y Xa en la curva correspondiente con la imagen tomada con alto nivel de energía.

En la siguiente imagen se muestra como ha sido calculado este factor Sd :

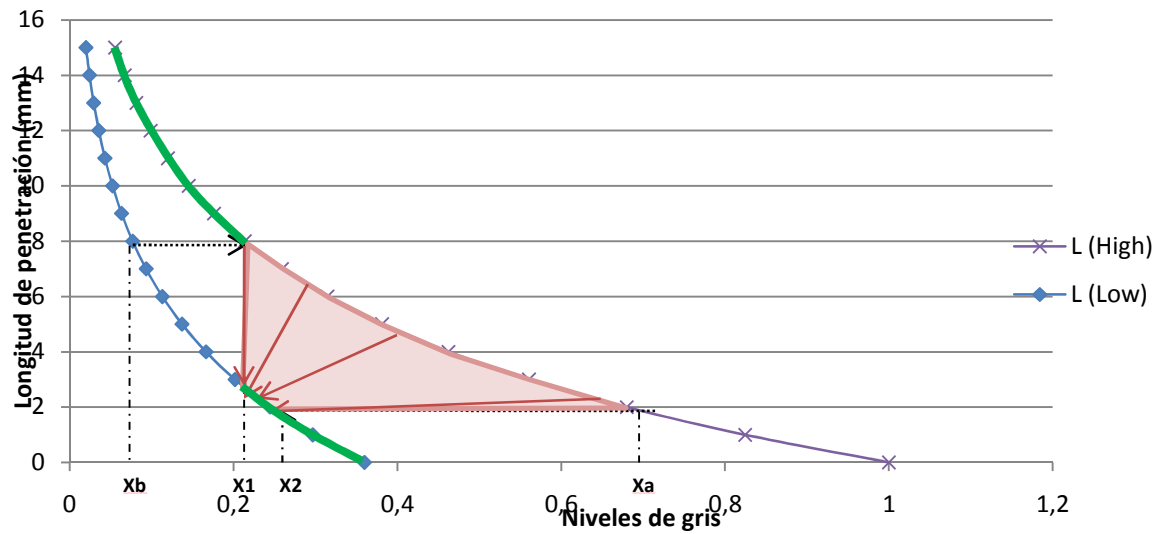


Figura 3.4: "Downscaling"

Ahora se deben recalcular los nuevos valores para todos los píxeles que se encuentren entre $X1$ y Xa en la curva correspondiente con la imagen de alta intensidad. El factor Sd es calculado de manera similar al caso del "upsampling" pero en este caso cambiando los umbrales.

$$Sd = \frac{(X2 - X1)}{(Xa - X1)} \quad \text{Eq.3.4}$$

Tras remplazar las variables y despejar $matrix_{F(i,j)}$ nos queda:

$$Sd = \frac{(matrix_{F(i,j)} - X1)}{(matrix_{H(i,j)} - X1)} \quad \text{Eq.3.5}$$

$$matrix_{F(i,j)} = Sd * (matrix_{H(i,j)} - X1) + X1 \quad \text{Eq.3.6}$$

En este caso la variable $matrix_{H(i,j)}$ es el valor del pixel en la posición (i,j) en la imagen tomada con alto nivel de intensidad.

La imagen fusionada se compone de píxeles pertenecientes con la línea verde, Fig.3.4. Como en el "upsampling" gracias al escalado hay una continuidad de niveles de gris.

4 Realización del estudio experimental

Para desarrollar este estudio se ha empleado un pequeño cubo de plástico (22x22x22mm) como modelo. El cubo tiene tres agujeros ($\varnothing=4$ mm) que atraviesan el cubo, dos transversalmente y otro longitudinalmente como es mostrado en las siguientes imágenes:



Figura 4.1: Fotos del cubo

Se ha utilizado un cubo con agujeros para analizar en primer lugar la reconstrucción en 3D sin el metal, para observar cómo es el comportamiento de los artefactos en ausencia del metal.

Una vez hecha la reconstrucción del cubo sin metal, se han introducido en los dos agujeros transversales dos pequeñas barras de metal y con el cubo así se han obtenido tres pilas de proyecciones a diferentes niveles de intensidad, a baja, media y alta. El detector Metrotom guarda estas pilas de 700 proyecciones consistentes en varios millones de píxeles en una imagen en escala de grises digital en una pila de archivos con la extensión float.32, debido a esta extensión los niveles de gris van entre 0 y 1.

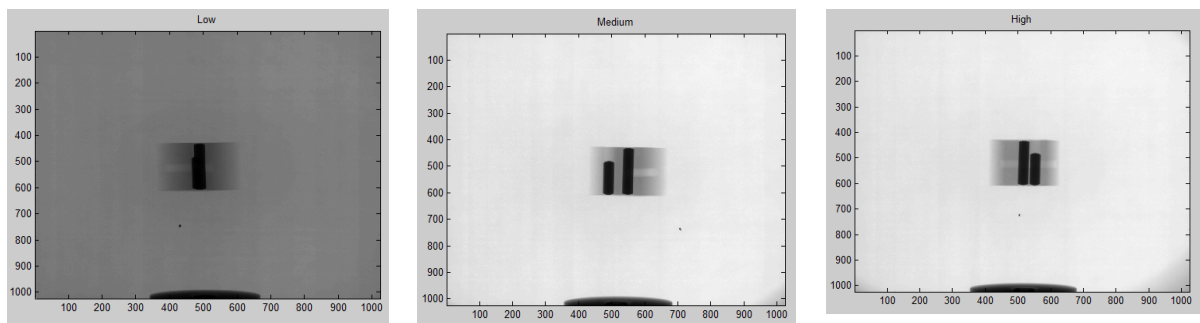


Figura 4.2: Ejemplo de proyecciones obtenidas con diferentes ángulos tomadas con baja (izq.), media (centro) y alta (dcha.) nivel de intensidad.

Como ha sido explicado antes, la pieza de trabajo ha sido fijada para evitar el movimiento durante la adquisición de las pilas de proyecciones. Así, los correspondientes píxeles de una proyección individual representan el mismo área de la pieza de trabajo tanto en baja, media y alta intensidad. Gracias a esto, los píxeles de las diferentes imágenes pueden ser comparados y seleccionados para crear una nueva imagen fusionada.

La siguiente tabla muestra los parámetros empleados para las medidas en la TC, dónde se observa que se ha usado el máximo y mínimo nivel de tensión disponible, para así trabajar con los dos límites:

	Tensión(kV)	Intensidad (μ A)	Tiempo de integración (ms)	Ganancia (pF)
<u>Alta</u>	220	370	800	1
<u>Media</u>	150	370	800	1
<u>Baja</u>	80	370	800	1

Tabla 4.1: Parámetros usados para las medidas en la TC

Las proyecciones correspondientes con el cubo obtenido con alta y baja intensidad han sido reconstruidas y posteriormente se han hecho cortes transversales de las reconstrucciones en 3D para analizar los valores máximos de artefactos. Y así tenerlas como referencia para que las siguientes medidas tengan como objetivo reducir estos artefactos.

Las medidas realizadas de dichos artefactos son las siguientes:

- Media y desviación estándar tanto en el aire como en el plástico.
- Cálculo del contraste entre los diferentes materiales (aire-plástico, plástico-metal), de acuerdo con la definición de contraste de la norma ISO 15708-1:2002(E).
- Cantidad y calidad de los artefactos en las imágenes (efectos del endurecimiento del haz en el “cupping”, rayas y bandas negras)

Se han realizado diferentes reconstrucciones:

- I. Reconstrucción sin las barras de metal en el interior
- II. Reconstrucción con las barras de metal a alto nivel de tensión
- III. Reconstrucción con las barras de metal a bajo nivel de tensión
- IV. Reconstrucción con las barras de metal a través de la fusión de las piezas de proyecciones obtenidas a alto y bajo nivel de energía haciendo uso del escalado (tanto “upscaling” como “downscaling”)
- V. Reconstrucción con las barras de metal a través de la fusión de las piezas de proyecciones obtenidas a alto y medio nivel de energía haciendo uso del escalado (tanto “upscaling” como “downscaling”)
- VI. Reconstrucción con las barras de metal a través de la fusión de las piezas de proyecciones obtenidas a alto y bajo nivel de energía sin escalado

El flujo de trabajo utilizado en el proceso de fusión es el siguiente:

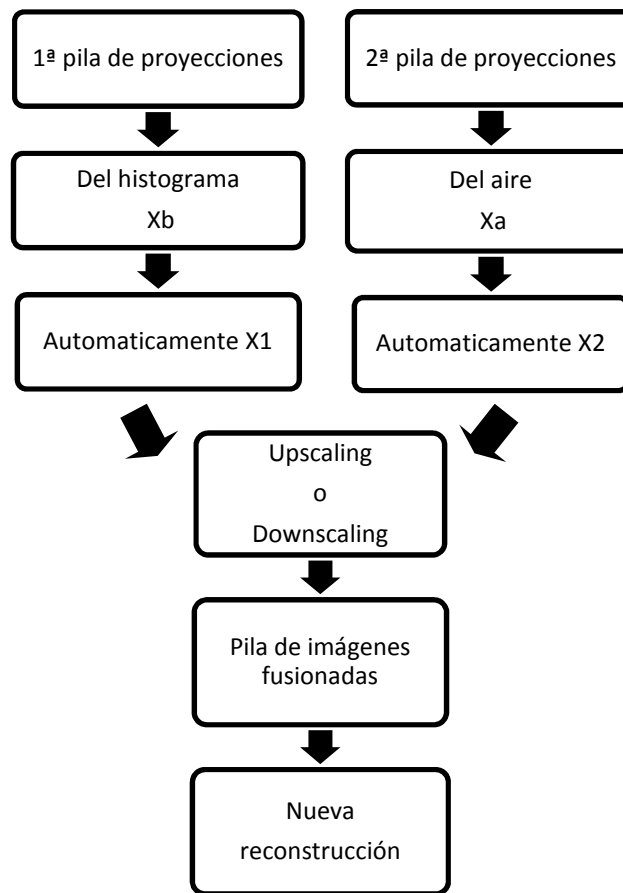


Figura 4.3: Flujo de trabajo en la fusión de imágenes

Cada vez que hay una nueva pila de imágenes fusionadas, mediante el software VG-Studio [VOLUME10] se han realizado en torno a 300 cortes en el plano XY para el posterior análisis. Se ha elegido este plano porque en él se observan las dos barras de metal cortadas transversalmente con los artefactos producidos.

Para cuantificar estos resultados se ha implementado un pequeño software para calcular la media y la desviación estándar en un área específica, y otro para poder observar el contraste entre los bordes y el comportamiento de los píxeles (principalmente los situados entre las dos barras de metal) afectados por los artefactos.

4.1 Plan experimental

El objetivo de estos experimentos es tratar de reducir el efecto de los artefactos originados por las dos barras de metal colocadas en el interior del cubo de plástico. Para ello tenemos tres pilas de proyecciones, cada una calculada a una intensidad diferente, baja, media y alta. Las proyecciones tomadas con alto nivel de intensidad estarán siempre presentes en los experimentos, porque como ha sido mencionado con anterioridad son las mejores situadas para la reducción de los artefactos.

Por lo tanto las fusiones que se van a realizar van a ser en primer lugar baja con alta y posteriormente media con alta. Las fusiones serán calculadas tanto con “upscaling” como con “downscaling”, tratando de obtener una característica que diferencia los dos métodos de escala implementados. También se realizarán una serie de experimentos sin el uso del escalado para verificar su importancia.

La idea que va a ser usada en los experimentos para buscar el correcto valor del umbral X_b , es ajustar este valor donde acaba el primer pico en el histograma correspondiente con la imagen de baja intensidad. Los valores cercanos al final del pico serán los utilizados para encontrar un buen contraste entre el metal y el plástico, pues el primer pico corresponde con los píxeles que representan el metal.

El umbral superior, X_a , será calculado a partir de la media y la desviación estándar de las áreas seleccionadas en las zonas pertenecientes al aire. Los correspondientes X_1 y X_2 son automáticamente calculados gracias al software implementado. Una vez se tiene el valor de los cuatro umbrales el valor de S_u o S_d , dependiendo si se trabaja con “upscaling” o “downscaling” es también calculado.

Es importante tener un especial cuidado con el valor del factor S , porque si este valor es inferior a cero la fusión de las imágenes carece de sentido. Pues significaría que en el gráfica 3.3 y/o 3.4 el valor X_1 es mayor que X_2 con la consecuente mezcla de píxeles.

En los dos siguientes apartados 4.1.1 y 4.1.2 se presentan los experimentos realizados, pero el análisis de los mismos se realizará en la sección 4.3 Presentación de los resultados con fusión.

4.1.1 Experimentos con las proyecciones de bajo y alto nivel de energía

La primera tanda de experimentos ha sido realizada para fusionar las imágenes con bajo y alto nivel de intensidad. Los experimentos se considerarán satisfactorios cuando algunos de los artefactos mencionados con anterioridad (“cupping”, bandas negras o rayas...) sean reducidos sin modificar otras características. Estos experimentos se realizarán tanto para “upscaling” como para “downscaling”.

En la Tabla 4.3 se muestran los resultados positivos obtenidos mediante upscaling, considerando positivos aquellos resultados con valor de S_u mayor que cero. Para llegar a establecer estos valores, varios fueron los experimentos realizados, pues hubo que ir distanciando los umbrales X_b y X_a hasta lograr un valor de S_u positivo, a modo de ejemplo se muestran algunos experimentos negativos en la Tabla 4.2.

	X_b	X_1	X_2	X_a	S_u
Bajo-Alto	0,1371	0,4899	0,2391	0,9	-2,0458
Bajo-Alto	0,1118	0,3751	0,2391	0,9	-1,0672
Bajo-Alto	0,1	0,3123	0,2391	0,9	-0,5262
Bajo-Alto	0,1	0,3123	0,2518	1	-0,088

Tabla 4.2: Experimentos negativos en la fusión de proyecciones de bajo y alto nivel de tensión

	Xb	X1	X2	Xa	Su
Bajo-Alto I	0,08	0,1886	0,2518	0,98	0,3681
Bajo-Alto II	0,0818	0,192	0,2518	0,98	0,3516
Bajo-Alto III	0,05	0,1224	0,2518	1	0,6411

Tabla 4.3: Experimentos con las pilas de proyecciones pertenecientes a bajo y alto nivel de intensidad utilizando el método del “upscaling”

Tras distanciar los umbrales X_b y X_a suficientemente se ha obtenido un valor positivo de S_u , que permite realizar la reconstrucción en 3D.

Igual que en el caso anterior se ha precisado de una alta separación de los umbrales en el caso del “downscaling” para lograr un valor de S_d positivo.

	Xb	X1	X2	Xa	Sd
Bajo-Alto I	0,0818	0,192	0,2518	0,98	0,0798585
Bajo-Alto II	0,05	0,1224	0,2518	1	0,1474

Tabla 4.4: Experimentos con las pilas de proyecciones pertenecientes a bajo y alto nivel de intensidad utilizando el método del “downscaling”

4.1.2 Experimentos con las proyecciones de medio y alto nivel de energía

Una vez se han terminado los experimentos fusionando proyecciones de bajo y alto nivel de intensidad, el siguiente paso será fusionar las imágenes de media y alta. El objetivo de estas medidas es mejorar los resultados obtenidos previamente. El camino para lograrlo será el mismo que ha sido aplicado con anterioridad, buscar el punto más preciso donde acaba el primer pico del histograma correspondiente al metal, pero esta vez en el histograma correspondiente con la imagen de media intensidad.

En la siguiente tabla se muestran diferentes valores utilizados para ajustar el valor de X_b y el correspondiente valor de S_u :

	Xb	X1	X2	Xa	Su
Medio-Alto I	0,2	0,3191	0,5776	0,9	0,6846
Medio-Alto II	0,1809	0,286	0,5668	0,8845...	0,7277
Medio-Alto III	0,1601	0,2497	0,5668	0,8845...	0,7798

Tabla 4.5: Experimentos con las pilas de proyecciones pertenecientes a medio y alto nivel de intensidad utilizando el método del “upscaling”

Los puntos de suspensivos en el cuadro de X_a indican que ese valor es sólo para la primera pareja de imágenes, y que va cambiando con cada nuevo par de parejas, al igual que X_2 y por lo tanto S_u .

Finalmente, la fusión también se ha realizado con las pilas de imágenes de medio y alto nivel de intensidad aplicando el método del “downscaling”.

	Xb	X1	X2	Xa	Sd
Medio-Alto I	0,2	0,3191	0,5668	0,8845...	0,4381
Medio-Alto II	0,1671	0,2626	0,5668	0,8845...	0,4892

Tabla 4.6: Experimentos con las pilas de proyecciones pertenecientes a medio y alto nivel de intensidad utilizando el método del “downscaling”

Las fusiones también se han llevado a cabo sin el uso del escalado, para verificar que es necesario el uso de un factor de escala para ajustar las pilas de imágenes obtenidas a diferente energía, porque los correspondientes píxeles en dos proyecciones diferentes no coinciden en niveles de gris.

4.2 Criterios de evaluación

Como ha sido presentado en el capítulo 1.3 Estructura del trabajo, antes de empezar a fusionar las imágenes se necesita una referencia que tener en cuenta, por esa razón se han realizados cortes transversales sobre el cubo sin las barras de metal.

Con motivo de evitar posteriores confusiones, cabe destacar que los cortes obtenidos a partir del software VG-Studio son almacenados como archivos con extensión .raw, por este razón los niveles de gris varían entre 0 y 65535, a diferencia de las proyecciones obtenidas directamente del Metrotom dónde era entre 0 y 1 debido a la extensión .float32.

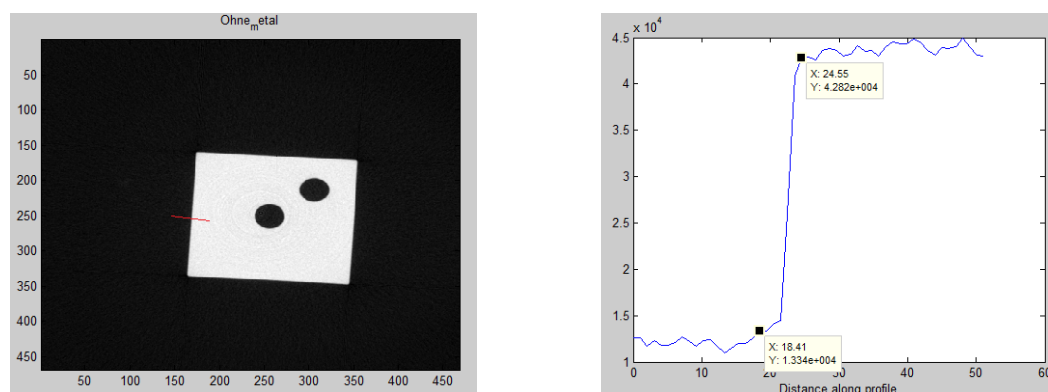


Figura 4.4: Corte del cubo de plástico sin las barras de metal y perfil del borde

Como se puede observar en la Fig.4.4, el corte no presenta casi ningún artefacto (sólo una pequeña muestra de anillos, véase Anexo II), además los bordes son limpios tanto en el interior como en el exterior. Después de analizar varios cortes centrales en distintas posiciones se puede decir que hay entre 4-5 píxeles y 30000 niveles de gris entre el aire y el plástico.

El valor medio del aire y del plástico también ha sido calculado, dando en el plástico 44500 niveles de gris con una desviación estándar cercana a 85 y en el aire 11700 con una desviación estándar de 50.

Tras observar el comportamiento en ausencia de artefactos del cubo, se ha analizado como es el comportamiento del cubo con las barras de metal en su interior a alto nivel de intensidad. Como se ha explicado antes, las proyecciones tomadas a alto nivel de intensidad reducen la posibilidad de aparición de artefactos, así que los valores aquí obtenidos serán los máximos con los que nos vamos a encontrar y los cuales habrá que reducir.

Tras hacer la reconstrucción y seleccionar un corte central, en la Fig.4.5 se pueden observar claramente el efecto del “cupping” y de las bandas negras en la vecindad de los cilindros metálicos.

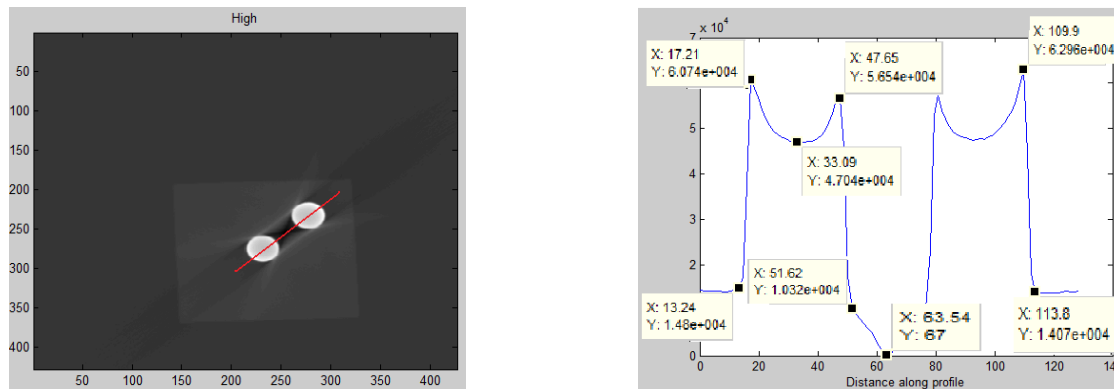


Figura 4.5: Corte central del cubo con barras de metal tomado a alto nivel de intensidad y el correspondiente perfil a lo largo de los agujeros

En el área no afectada por artefactos entre el aire y el plástico hay en torno a 5-6 píxeles y sobre 2250 niveles de gris. En los bordes entre el plástico y el metal son 4-5 los píxeles necesarios para pasar de un material a otro y el salto en los niveles de gris es de 47000.

El efecto del “cupping” es claramente visible en la Fig.4.5 y el porqué de su nombre debido a su forma de copa. Aunque todo el círculo es el mismo material, metal, con teóricamente el mismo valor de nivel de gris, hay una gran diferencia entre el borde y el interior del mismo, exactamente 13700 niveles de gris. Expresado en porcentaje hay una reducción del 21.67% entre el máximo valor, 60000, y el más bajo en el fondo de la copa. Esta variación es un importante valor que tendrá que intentar ser reducido.

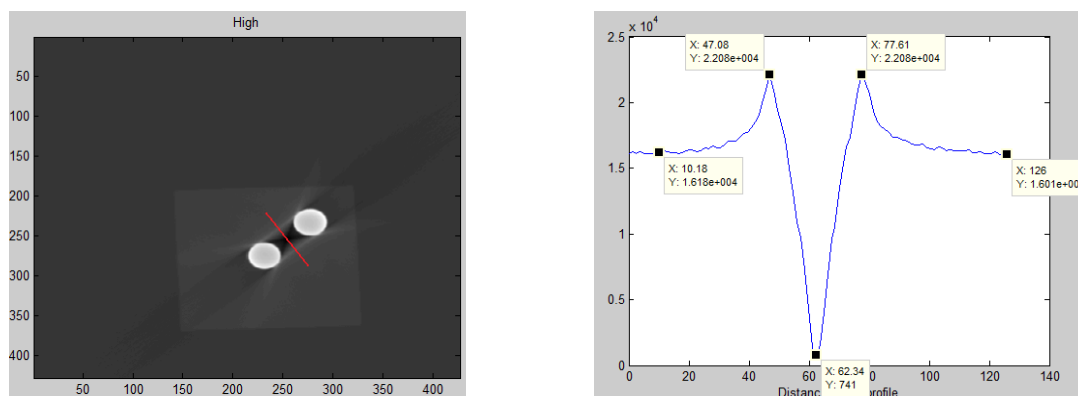


Figura 4.6: Corte central del cubo con barras de metal tomado a alto nivel de intensidad y el correspondiente perfil a través de los agujeros

El valor de la media y la desviación estándar libre de artefactos en el plástico es de 16000 y 100 respectivamente. Entre los agujeros, hay un área que supuestamente debería tener el valor de nivel del gris del plástico, pero debido al efecto del endurecimiento del haz hay zonas negras que hacen que esto no sea posible. Como se puede observar en el perfil correspondiente con la línea roja, hay importantes variaciones con respecto al valor medio del plástico, con píxeles un 37.5% sobre la media y otros casi con un valor de 0.

El valor medio del aire es de 13600 con una desviación estándar de 25, es importante resaltar que trabajando con alto nivel de intensidad hay sólo una diferencia de 2400 niveles

de gris entre la media del plástico y el aire, mucho menor que la diferencia obtenida sin las barras de metal que era de 30000 niveles de gris.

Igualmente, se ha analizado la reconstrucción de las proyecciones a baja intensidad.

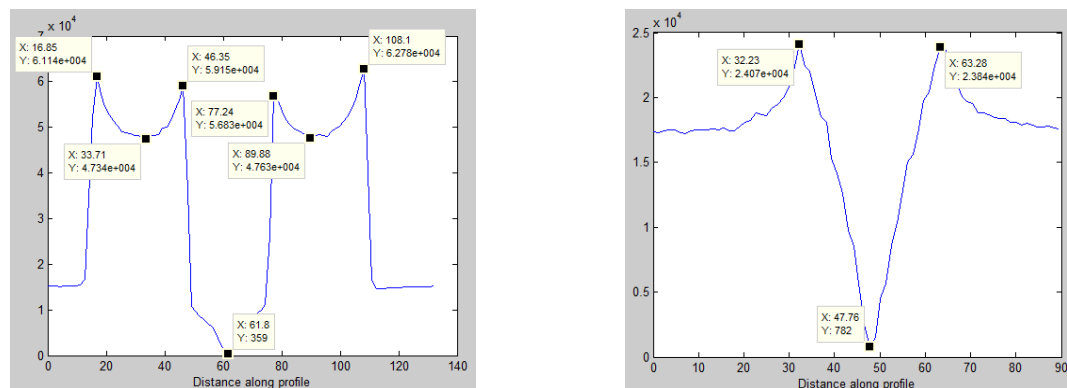


Figura 4.7: Perfiles del cubo con las barras de metal tomado a bajo nivel de tensión, a lo largo (izq.) y a través (dcha.) de los agujeros

En este caso el valor medio del aire en una zona libre de artefactos es de 15400 niveles de gris y 17200 en el plástico, lo que significa una diferencia del 10.47%.

Los valores tanto del “cupping” como de las bandas negras son muy similares a los obtenidos con alto nivel de tensión, en este caso hay una diferencia del 24.08% en el “cupping” y en las bandas negras hay píxeles un 39.50% mayores y 95% menores.

4.3 Presentación de los resultados con fusión

Después de varios tests fusionando las pilas de imágenes aplicando las dos opciones de escalado como ha sido presentado en la sección 3.1 Bases Teóricas, aquí se explican y comentan los resultados más importantes.

Los resultados se van a mostrar de acuerdo al punto 4.1 Plan Experimental.

4.3.1 Fusión de las pilas de proyecciones obtenidas con baja y alta energía

En la Fig.4.8 se muestran los histogramas pertenecientes con la primera proyección tomada con baja tensión (izq.) y la primera tomada con alta tensión (dcha.), del histograma de imagen de baja tensión se ha seleccionado manualmente el primer umbral, X_b , donde acaba el primer pico. Así, los valores más oscuros se separan del resto, es decir, los valores pertenecientes al metal.

Para evitar dudas posteriores se puede aclarar que los colores mostrados en los cortes no se corresponden con el negro (0) y el blanco (1) representados en los histogramas. En los histogramas el primer pico (izq.) corresponde con el metal (que es el material que más rayos X absorbe) pero en el corte se representa con el color blanco, el segundo pico pertenece al plástico y el tercero y mayor con el aire, de acuerdo con el histograma el aire debería ser blanco y el metal negro, pero Matlab muestra los colores al revés. Es importante tener esto claro para evitar posteriores errores de interpretación.

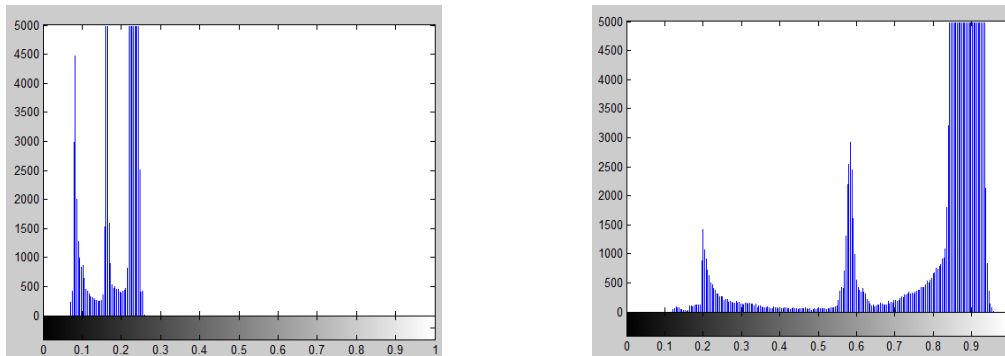


Figura 4.8: Histogramas de la primera proyección tomada con baja tensión (izq.) y la primera con alta tensión (dcha.)

En vista de las grandes diferencias entre ambos histogramas y teniendo en cuenta el método empleado para fusionar las imágenes, las esperanzas de obtener algo representativo no fueron muy elevadas. Como se puede observar en la Fig.4.9. las curvas correspondientes con alta y baja intensidad están muy alejadas, por ello y para evitar una superposición entre $X1$ y $X2$ los umbrales Xb y Xa deberían estar muy separados.

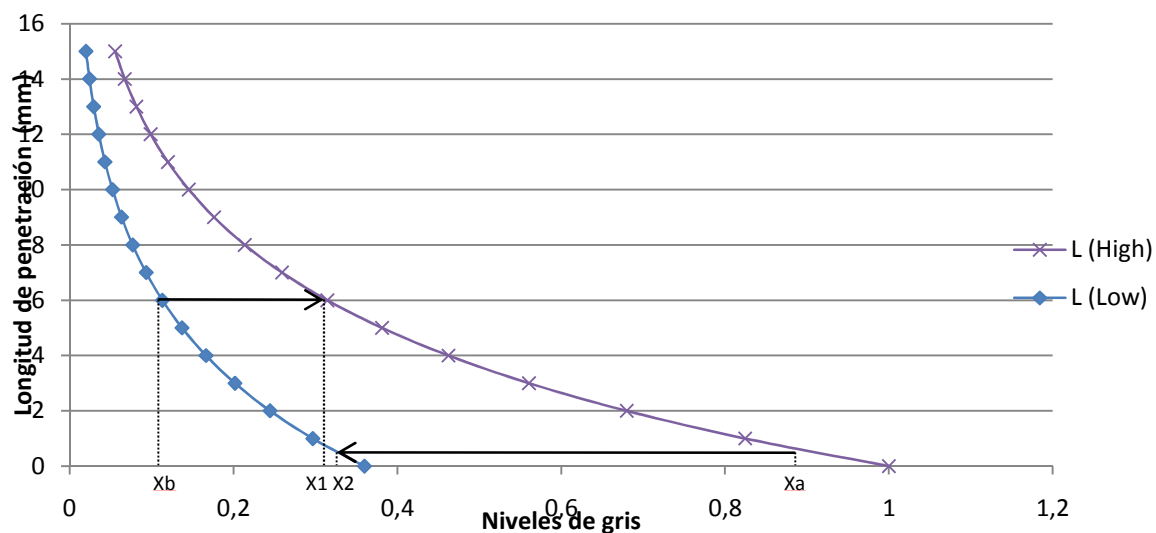


Figura 4.9: Curvas logarítmicas que representan las proyecciones de baja y la alta intensidad

Se ha empezado tomando para Xb el valor de 0.1371, que es dónde acaba el primer pico y para Xa directamente 0.9 (un valor superior al obtenido como media del aire, para separar más los umbrales). Una vez se disponen de un valor para Xb y Xa , $X1$ y $X2$ son directamente calculados, al igual que el factor de escala S , en este caso S_u pues estamos trabajando con “upscaling”.

Como era de esperar el valor de S_u es menor de cero, lo que implica el solapamiento entre $X1$ y $X2$. Después de varios experimentos para evitar el solapamiento se ha logrado un valor de $S_u=0.3516$ con valores de $Xb=0.0818$ y $Xa=0.98$, pero como se observa estos valores no coinciden con la idea inicial de tomar Xb dónde acaba el primer pico y además Xa es bastante mayor del valor medio obtenido del aire. De todas formas se ha reconstruido la correspondiente pila de imágenes y se han analizado los resultados.

Aunque el valor de S_u es mayor que cero, las condiciones del cálculo de los umbrales no se han cumplido, por ello los resultados obtenidos no mejoran la situación inicial, si no que la empeoran considerablemente.

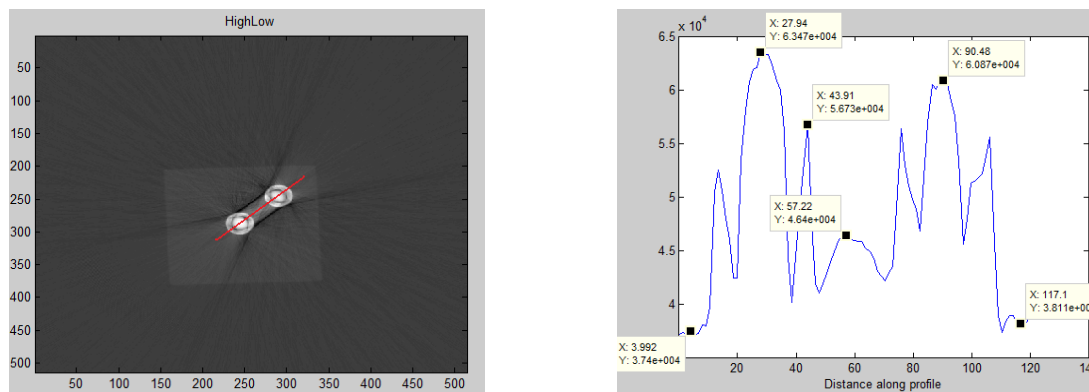


Figura 4.10: Fusión de imágenes de baja y alta intensidad, corte (izq.) y perfil (dcha.)

A primera vista se pueden observar el gran número de artefactos presentes, los cuales están cuantificados en el perfil que corresponde con la línea de color rojo que atraviesa sendos círculos.

Tras la vista de los resultados obtenidos, la fusión de las pilas de proyecciones de baja y alta intensidad queda descartada, tanto en el “upscaling” como en el “downscaling”. En el “upscaling” los resultados obtenidos son claros, y en el “downscaling” para lograr un valor de S_d mayor que cero se precisan valores de X_b menores de 0.08 y mayores de 0.95 para X_a , por lo tanto no se cumplen las condiciones iniciales y los resultados obtenidos serán similares a los de “upscaling”. Por esta razón no es necesario hacer la correspondiente reconstrucción en 3D.

4.3.2 Fusión de las pilas de proyecciones obtenidas con media y alta energía

Descartada la fusión entre proyecciones obtenidas con bajo y alto nivel de energía, los experimentos siguientes se van a basar en la fusión de imágenes obtenidas con medio y alto nivel de energía.

Como se observa en la Fig.4.11, las curvas correspondientes con los niveles medio y alto de energía están más cercanas que en el caso anterior, por esta razón ha sido más fácil fusionar las correspondientes pilas de imágenes.

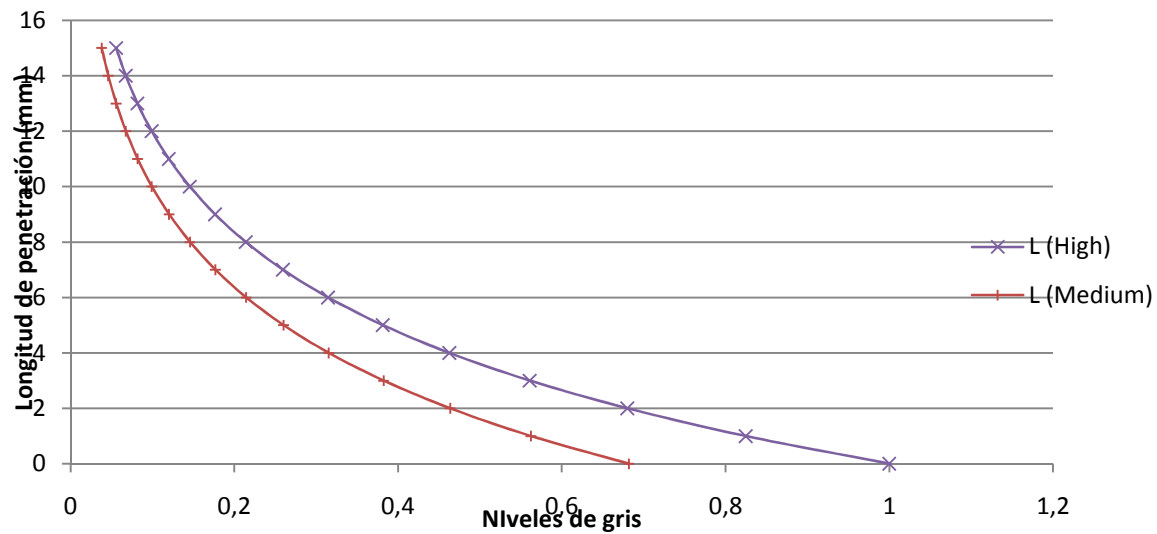


Figura 4.11: Curvas logarítmicas que representan las imágenes de media y alta intensidad

Esta proximidad también se puede observar en los siguientes histogramas, a partir de los cuales se ha basado el cálculo de los umbrales.

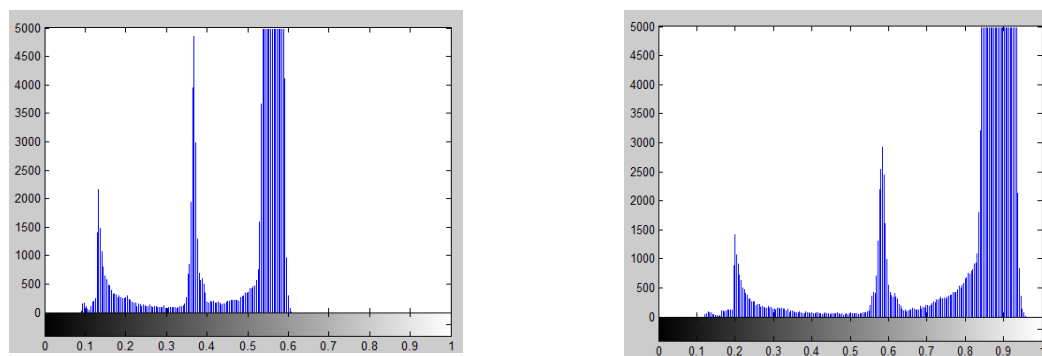


Figura 4.12: Histogramas de la primera imagen tomada con media intensidad (izq.) y la primera con alta intensidad (dcha.)

Seleccionando $X_b=0.2$ y $X_a=0.9$ se obtiene un valor de $S_u=0.6846$, por lo tanto sin problemas de solapamiento entre X_1 y X_2 .

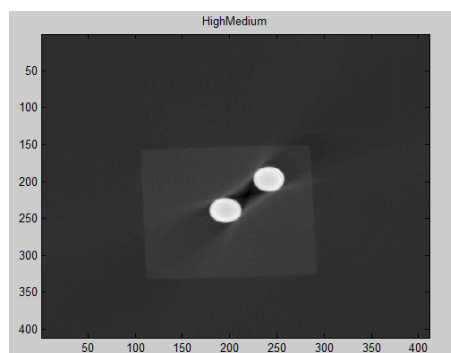


Figura 4.13: Corte de la fusión de imágenes tomadas con medio y alto nivel de intensidad

A primera vista se pueden observar en la Fig.4.9 mejoras con respecto a la fusión con la imagen de baja intensidad, obteniendo un corte más similar al obtenido directamente con la reconstrucción de alta intensidad.

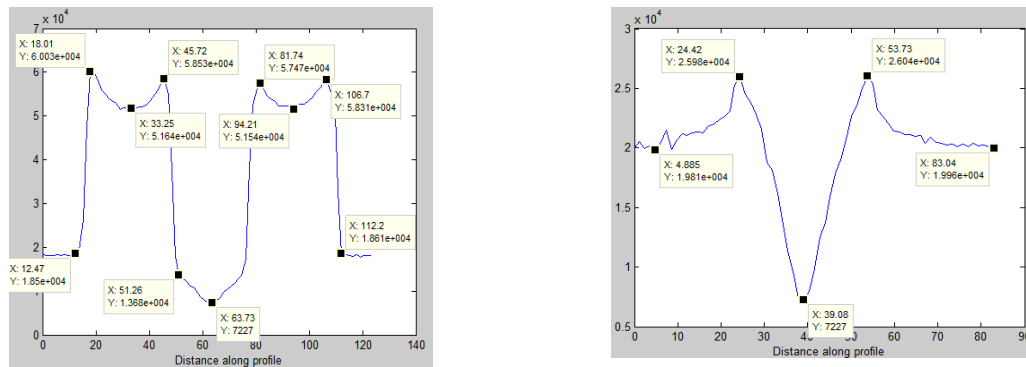


Figura 4.14: Perfil de la fusión con proyecciones de media y alta intensidad, a lo largo (izq.) y a través (dcha.) de los círculos. Upscaling I

La fusión de las pilas de imágenes tomadas con medio y alto nivel de energía muestran las primeras mejoras debido a la reducción del artefacto conocido como “cupping” al igual que reduciendo el efecto producido por las bandas negras.

Por un lado, como se puede ver en la Fig.4.14 los valores de “cupping” se han reducido obteniendo una diferencia cercana a 8400 niveles de gris, más pequeña que 13700 que era la obtenida sin fusión, la reducción que era del 21.67% ha pasado al 14%.

Por otro lado, cuando se ha analizado el perfil a través de los círculos se ha observado que el mínimo valor entre los agujeros ha aumentado, ahora está cerca de 7000 dónde antes era casi cero. Así, la diferencia no es ahora tan grande, ha pasado del 95.38% al 63.82%. En este caso la media del plástico es 19900 y hay valores “sólo” un 30.65% mayores dónde antes eran 37.50%. El valor medio del aire es ahora de 17500 niveles de gris.

De acuerdo con el contraste entre aire y plástico no hay grandes diferencias, pues el número de píxeles necesarios para dicho cambio oscila igualmente entre 5 y 6.

Una vez obtenidas estas mejoras, el siguiente paso es intentar ajustar más el valor de X_b para reducir más los artefactos. Trabajamos ahora con un valor para X_b de 0.1809 y el valor de X_a se ha dejado libre para ser calculado automáticamente para cada par de imágenes a partir de las tres áreas pertenecientes al aire. En este primer caso X_b ha resultado ser 0.8845 dando un valor de S_u igual a 0.7277.

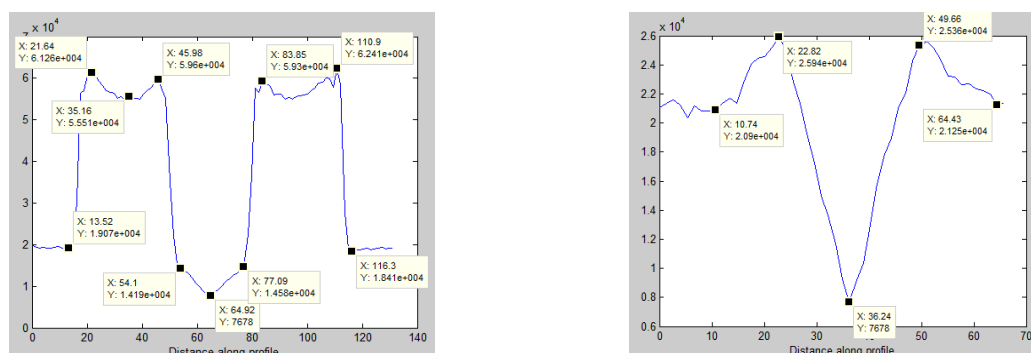


Figura 4.15: Perfil de la fusión con proyecciones de media y alta intensidad, a lo largo (izq.) y a través (dcha.) de los círculos. Upscaling II

Como se observa en la figura anterior ha habido algunas mejoras, ya que el efecto del “cupping” se ha reducido a una diferencia de 5500, tan solo una variación del 9% dónde antes teníamos un 14%. También ha disminuido el efecto de las bandas negras, ahora los valores son un 25.60% mayores y un 63.29% menores.

En esta última tanda de experimentos se ha elegido un valor de X_b igual a 0.1601, menor que el valor anterior, y como se puede ver en la Fig.4.12 este valor ya no se encuentra donde acaba el primer pico, si no un poco es su interior, este experimento se ha realizado para observar si se pueden mejorar los artefactos arriesgando un poco los píxeles pertenecientes al metal.

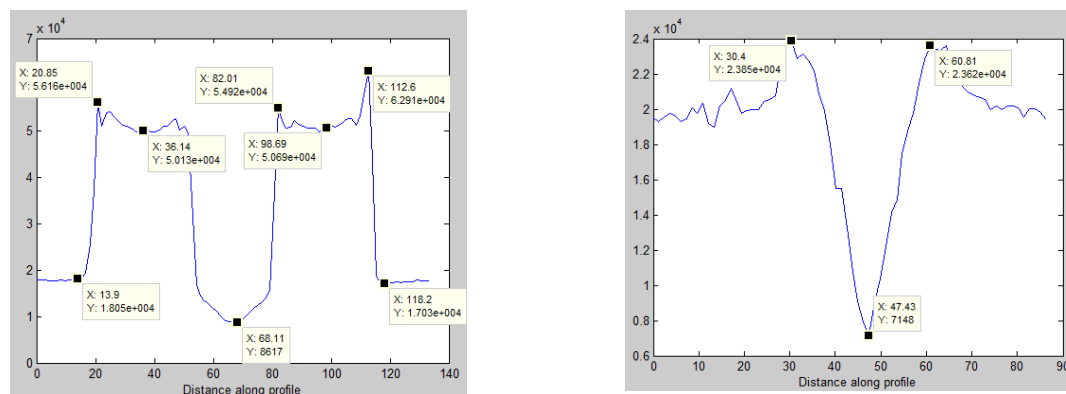


Figura 4.16: Perfil de la fusión con proyecciones de media y alta intensidad, a lo largo (izq.) y a través (dcha.) de los círculos. Upscaling III

Como es mostrado en la Fig.4.16, si el valor del umbral X_b no coincide con el final del pico del metal los resultados empiezan a ser incongruentes. En el “cupping” pese a parecer que se ha estabilizado el valor del metal, en verdad se han perdido valores, y comparando el valor máximo en el borde de la copa con el mínimo en el fondo de la misma vemos que hay un 18.39% de diferencia. En cuanto a las bandas negras se puede considerar que no hay diferencias con el caso anterior.

En este punto damos por finalizados los experimentos con el método del “upscaling” y cambiamos a “downcasing”, para averiguar si hay mejoras o desventajas.

Con el upscaling se ha observado que hay una mayor reducción de artefactos dejando libre el cálculo de X_a para cada par de imágenes, por ello este ha sido el camino a seguir, fijando inicialmente el valor de X_b a 0.2.

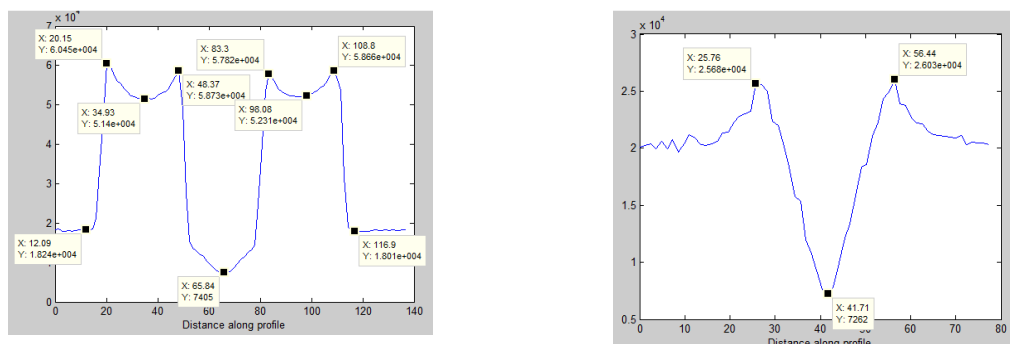


Figura 4.17: Perfil de la fusión con proyecciones de media y alta intensidad, a lo largo (izq.) y a través (dcha.) de los círculos. Downscaling I

El valor medio del aire es 17600 y 19850 en el plástico. Por otro lado en la zona del “cupping” el máximo valor para el metal es 60500 y el menor en el fondo de la copa 51400, lo que significa un 15.04% de diferencia. A través de los círculos y debido a las bandas negras el máximo valor es 26000 y el menor 7200, lo que implica valores un 31% mayores que la media y un 63.73% menores.

Al igual que en el caso del “upscaling” se han buscado ser más preciso en la selección del final del pico perteneciente al metal, en este caso se ha elegido un valor de $Xb=0.1671$, un valor un poco menos crítico que el anterior usado en el “upscaling”, ya que antes los resultados no han sido positivos.

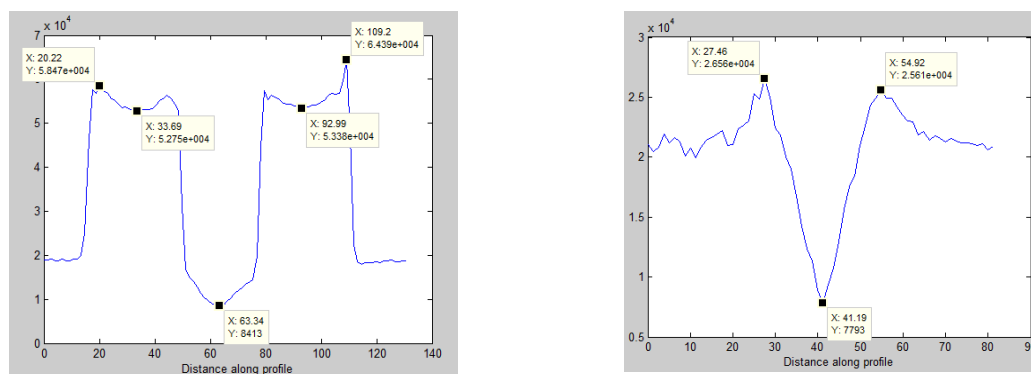


Figura 4.18: Perfil de la fusión con proyecciones de media y alta intensidad, a lo largo (izq.) y a través (dcha.) de los círculos. Downscaling II

Tras observar los perfiles resultantes se puede ver que la elección del umbral Xb tampoco ha sido la correcta, pues hay incongruencias en la parte que afecta el “cupping” y a las bandas negras.

De todas formas, la media en el aire es de 17875 y de 20550 en el plástico, lo cual implica una diferencia del 13%. En cuanto al “cupping”, el valor máximo asciende a 64400 y el mínimo a 53300, o lo que es lo mismo un 17.24% de variación.

Por otro lado el efecto de las bandas negras se ha mantenido, con valores máximos de 23850 y mínimos de 7100.

4.3.3 Fusión sin escalado

Después de fusionar las pilas de imágenes utilizando el escalado, se ha llevado a cabo un nuevo experimento para comprobar para intentar mejorar el contraste entre los diferentes materiales abarcando un mayor ancho de la escala de grises. La idea es tomar un “pico” de una imagen y fusionarlo con los otros picos que corresponden con otras imágenes.

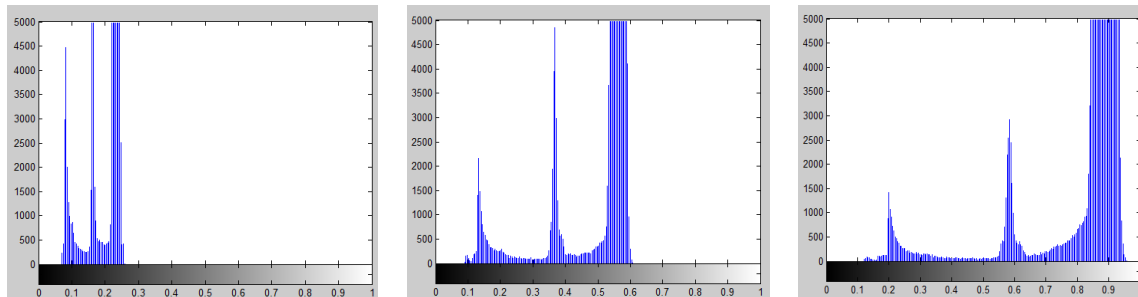


Figura 4.19: Bajo (izq.), medio (centro) y alto (dcha.) histograma

Inicialmente se va a fusionar las proyecciones de baja y alta intensidad. De la imagen tomada con baja intensidad seleccionamos los píxeles que están por debajo de 0.1, pertenecientes al metal y mayores a 0.2 pertenecientes al aire. Los píxeles correspondientes con el plástico se obtendrán de la imagen tomada a alta intensidad.

Tras realizar la reconstrucción en 3D analizamos los resultados:

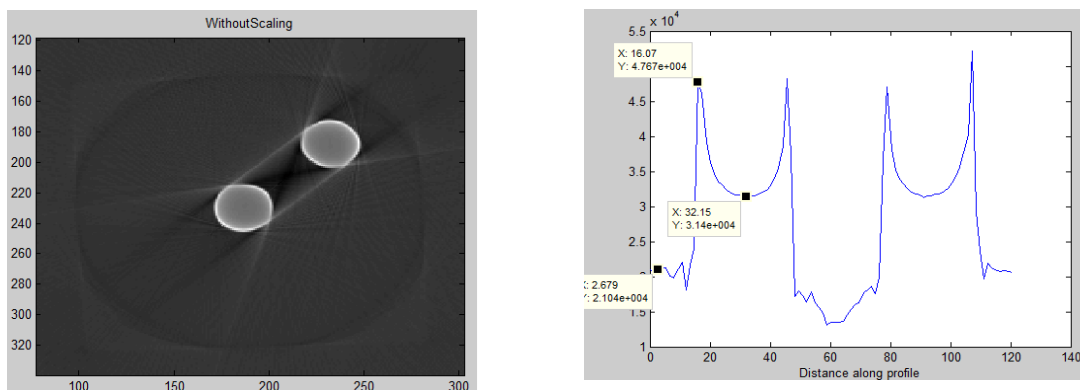


Figura 4.20: Corte correspondiente con la fusión de imágenes de baja y alta intensidad sin el uso del escalado

Como se puede apreciar en el corte transversal los resultados obtenidos no son buenos, pues además de empeorar visiblemente el efecto del “cupping”, la forma del cubo se ha distorsionado, perdiendo claramente el contraste en los bordes.

5 Evaluación y análisis de los resultados

Una vez que todos los experimentos han sido llevados a cabo y presentados, es tiempo de evaluar los resultados obtenidos. El objetivo de estos experimentos era ver la manera de reducir al máximo la cantidad de artefactos presentes, producidos principalmente por el endurecimiento del haz, y cuantificarlos comparándolos con los valores de referencia.

Los artefactos más visibles han sido el “cupping” y las bandas negras o rayas, por ello los experimentos han tenido como principal objetivo reducir estos artefactos. A continuación se van a comentar los experimentos principales y más relevantes y en la página siguiente en la Tabla 5.1 se muestra un resumen de todos ellos.

En cuanto a los artefactos, se puede observar que se ha logrado una importante reducción del “cupping”. Inicialmente en la reconstrucción del cubo con las barras de metal en su interior a un alto nivel de intensidad, los valores máximos en el “cupping” debidos al efecto del endurecimiento del haz eran de 60000 niveles de gris y los valores mínimos de 47000, lo que implica una diferencia del 21.67%. Después de fusionar la pila de media intensidad con la de alta (sección 4.3.2) se ha conseguido reducir este valor hasta un 9.02%, manteniendo el mismo valor máximo del metal.

Por otro lado, también se han conseguido mejoras en las bandas negras presentes entre los agujeros. Al principio, trabajando con la reconstrucción en 3D perteneciente a las proyecciones obtenidas con alto nivel de intensidad, la media en el plástico libre de artefactos era de 16000, y debido al efecto del endurecimiento del haz en las bandas negras había píxeles con valores máximos de 22000 y mínimos de 700, es decir, valores un 37.50% mayores de la media y un 95% menores. Después de la fusión usando el método del “upscaling” la media en el plástico ha aumentado a 20700 y debido a las bandas negras el máximo valor ha sido 26000 y el mínimo 7600, es decir valores un 25.60% mayores y un 63% menores.

Trabajando tanto con “upscaling” como con “downscaling” no ha sido posible incrementar el contraste entre el aire y el plástico, es más este contraste ha sido reducido. Cuando el cubo sin las barras de metal era analizado, se podía observar un contraste de casi 30000 niveles de gris entre el aire y el plástico, con niveles medios de 17500 en el aire y 44500 en el plástico, es decir una variación del 73.7%. Después de eso, cuando se ha reconstruido la pila de proyecciones obtenidas a alto nivel de intensidad, la diferencia era sólo de 2400 niveles de gris, desde los 13600 de aire a los 16000 del plástico, lo que significa sólo un 15% de variación, muy lejos de los valores sin las barras de metal.

Este valor del 15% no ha sido incrementado con ninguno de los diferentes experimentos realizados, es más, siempre se ha situado por debajo, tanto con el “upscaling” como con el “downscaling”.

Como resumen, se puede decir que cuando las correspondientes curvas logarítmicas de dos pilas de proyecciones se encuentran muy alejadas no es posible la fusión de las mismas mediante este método (ver 4.3.1 Fusión de las pilas de imágenes obtenidas con baja y alta

energía), debido a que los umbrales, X_b y X_a deben estar suficientemente separados para evitar el cruce entre X_1 y X_2 y la consiguiente mezcla de píxeles. Pero a la vez hay que tener cuidado con la separación de X_b y X_a ya que no deben superar unos límites máximo relacionados con los histogramas correspondientes porque dejan de cumplir las condiciones iniciales y la fusión carece de sentido.

Se ha observado además que el uso del escalado es necesario para obtener un buen nivel de contraste entre los diferentes materiales. Sin el escalado los bordes no están bien definidos y los resultados que se obtienen, como se puede ver en la Fig.4.16, no son nada positivos.

Para finalizar y como se ha podido observar, la reducción del “cupping” y las bandas negras es posible con una precisa selección del umbral inferior, X_b . Como se puede ver en la Tabla 5.1, en la *fusión Media-Alta III* con “upscaling” y *Media-Alta II* con “downscaling”, la elección de un incorrecto valor de X_b , por ajustarlo erróneamente al final del pico correspondiente con el metal, produce un incremento de los artefactos debido a la pérdida de píxeles correspondientes con el metal.

					"Cupping"			Bandas negras			
					Max	Min	Cupping	Max	Min	píxls..mayores	píxls..menores
Cubo sin metal	11700	44500	5-6	73,71%	0	0	0	0	0	0%	0%
Cubo a alto nivel de energía	13600	16000	5-6	15,00%	60000	47000	21,67%	22000	740	37,50%	95,38%
Cubo a bajo nivel de energía	15400	17200	5-6	10,47%	62700	47600	24,08%	24000	780	39,53%	95,47%

Upscaling

<i>Media-Alta I</i> Xb=0,2	17500	19900	5-6	12,06%	60000	51600	14,00%	26000	7200	30,65%	63,82%
<i>Media-Alta II</i> Xb=0,1809	18050	20700	5-6	12,80%	61000	55500	9,02%	26000	7600	25,60%	63,29%
<i>Media-Alta III</i> Xb=0,1601	16650	19350	5-6	13,95%	62000	50600	18,39%	23850	7100	23,26%	63,31%

Downscaling

<i>Media-Alta I</i> Xb=0,2	17600	19850	5-6	11,34%	60500	51400	15,04%	26000	7200	30,98%	63,73%
<i>Media-Alta II</i> Xb=0,1671	17875	20550	5-6	13,02%	64400	53300	17,24%	26000	7800	26,52%	62,04%

Tabla 5.1: Resumen de los resultados más importantes

6 Conclusiones y Perspectivas

La inspección de piezas industriales usando tomografía computerizada tiene una gran potencial en el campo de pruebas de materiales y en ensayos no destructivos. En este proyecto fin de carrera se ha mostrado un método para tratar con piezas industriales con alta relación de grosor y diferente absorción en las mediciones usando TC. La fusión de pilas de proyecciones tomadas a distinto nivel de intensidad es un método todavía en desarrollo.

Dos han sido los métodos utilizados para el escalado de las pilas de proyecciones, el “upscaling” y el “downscaling”, una vez realizados todos los experimentos no se han apreciado diferencias significativas entre ambos métodos, aunque cierto es que con el “upscaling” se han logrado pequeñas mejoras con respecto al caso del “downscaling”.

Los resultados obtenidos han sido positivos de acuerdo a que los artefactos presentes han sido reducidos, tanto el “cupping” como las bandas negras han visto decrementado su efecto negativo sobre la pieza. Quizá el resultado obtenido menos positivo ha sido la no mejora en el contraste de la pieza entre el plástico y el aire, el cual ha sido incluso reducido en un 3%.

Para futuras investigaciones es recomendado una corrección del endurecimiento del haz antes de la fusión de las diferentes pilas de proyecciones para prevenir la alta aparición de artefactos (ver [TUY83], [MORI81], [DEMA00], [KRUM08], [BARR04], [HSIE98]), ya que con la fusión directa de las proyecciones el efecto del endurecimiento del haz sigue presente y sería aconsejable un debilitamiento previo para que el efecto de los artefactos sea menor.

Otra tema que ha quedado pendiente ha sido el contraste entre los diferentes materiales, por ello se recomienda para futuros estudios encontrar un camino para trabajar con toda la banda de niveles de gris, con el fin de obtener un contraste adecuado entre los diferentes materiales, porque ha sido el tema donde menos mejoras se han obtenido, aunque también es verdad que la pila de imágenes de la que se partía no tenía el mejor contraste y por lo tanto puede que no sea posible mejorarlo.